第46卷　第4期
2023年4月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 4
Apr. 2023

祁连山排露沟流域青海云杉林更新特征对地形因子的响应

芦雄英[1]，刘贤德[1,2]，马　瑞[1]，赵维俊[2]，敬文茂[2]，何晓玲[3]，赵长兴[4]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州　730070；2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院（甘肃祁连山森林生态系统国家定位观测研究站），甘肃 张掖　734000；3. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 咸阳　712000；4. 兰州大学草地农业科技学院，甘肃 兰州　730000）

摘　要：为探讨祁连山青海云杉林微地形对天然更新苗的影响，选择祁连山排露沟流域分布的青海云杉为研究对象，采用C-均值模糊聚类分析将该流域15个固定样地的地形参数（海拔、凹凸度、坡度）划分为4种不同的微地形生境，研究微地形生境对更新苗的更新特征（更新苗密度、平均冠幅、平均基径和平均株高）产生的影响。结果表明：(1) 该流域的15个固定样地通过聚类分析将微地形生境划分为4类：高海拔陡坡、高海拔斜坡、低海拔凸地和低海拔凹地。(2) 不同微地形条件下更新苗密度和平均株高从高到低依次为低海拔凹地、低海拔凸地、高海拔斜坡、高海拔陡坡；更新苗的平均冠幅和平均基径从大到小依次为低海拔凸地>高海拔斜坡>低海拔凹地>高海拔陡坡；在平均株高方面，高海拔陡坡显著低于其他3种微地形。不同的海拔、坡度、坡向、坡位对更新苗的存活率和生长发育过程具有显著性影响。(3) 更新苗在不同微地形下大部分表现为聚集分布，聚集强度从高到低表现为高海拔陡坡>低海拔凸地>低海拔凹地>高海拔斜坡。(4) 从相关性分析的结果中显示，海拔、坡度、坡位与更新苗之间存在显著相关性（$P<0.05$）。综上所述，青海云杉林的天然更新受微地形生境的影响较为显著（$P<0.05$），在低海拔凸地和低海拔凹地中更新苗比较适合定居和生长发育。

关 键 词：青海云杉林更新苗；微地形；空间分布格局；海拔；祁连山

文章编号：1000－6060(2023)04－0604－10(0604～0613)

天然更新对森林生态系统生物多样性的保护、森林群落稳定性的维持及演替过程起到重要作用。在植物的整个生活史中，幼苗阶段是个体生长发育最为脆弱、对周围环境改变最为敏感的时期，同时也是个体数量变动最大的阶段[1]。如长期受到自身的遗传条件或植物生理、生态特性及自身内在自然环境等方面的间接因素影响，其与地形因子、林分结构、林分内生物因子、人为引起的自然干扰因子等有关联[2-5]。其中，地形因子是天然更新中最重要的因子[6]。对更新苗的更新和生长起到关键性作用，从而影响到森林更新的质量问题。

地形对光照、水分、温度及营养等多种因子的二次分配起决定性作用[7]，地形因子中的海拔、坡位、凹凸度、坡向、坡度为多维变量内的重要组分，微地形的形成对森林群落内的物种有显著性影响[8]。Daws 等[9]对巴拿马样地 Barro Colorado Island（BCI）的研究发现，地形引起的水分含量梯度和枯枝落叶层厚度的变化会影响树木的出苗率和死亡率，为物

收稿日期：2022-07-14；　**修订日期：**2022-09-26
基金项目：国家自然科学基金（32060247，U21A20468）；省级林业和草原自列科技项目（2022kj005）；甘肃祁连山森林生态系统国家定位观测研究站运行补助（2022132262）资助
作者简介：芦雄英（1996-），女，在读硕士，主要从事森林培育研究. E-mail: 2995472727@qq.com
通讯作者：刘贤德（1963-），男，博士，研究员，主要从事森林水文等相关研究. E-mail: liuxiande666@163.com

种共存提供有效条件。Lu等[10]研究发现地形因子、谱系发育距离和邻居密度均对八大公山幼苗存活状况和生长及发育过程具有重要作用。赵家豪等[11]发现江西武夷山南方铁杉(*Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis*)针阔混交林幼树的更新与微地形之间存在显著性影响。赵雪等[12]发现地形与典型阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林幼苗的存活和死亡之间具有显著影响。地形是复杂又综合的环境因子，不同地形中的更新苗受水分、光照、地被物等的影响，导致更新苗的生长发育状况各不相同。研究发现，不同海拔、坡向对幼苗在自然更新方面存在显著性影响，但国内现存的研究中发现地形对青海云杉幼苗影响的研究较少[12]。进行青海云杉林天然更新苗对微地形的响应研究，对祁连山森林生态系统的健康稳定和可持续发展均具有非常重要的意义。

祁连山是中国西部主要山脉之一，位于三大高原交汇带，祁连山山地森林的主要建群种青海云杉(*Picea crassifolia*)，是中国青藏高原东北边缘生长的特有树种，分布面积占祁连山水源涵养林面积的24.74%，占乔木林面积的75.72%[13-14]。近年来，环保部门等单位十分重视祁连山出现的一系列生态环境问题，当地政府采取了一系列措施对祁连山的生态环境展开恢复工作。因此，本文以祁连山排露沟流域青海云杉林为研究对象，对固定样地中微地形的地形因子和更新苗进行调查来获取数据，为森林生态系统稳定性的保护和维护提供科学的理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段西水林区排露沟流域(100°17′E，38°24′N)，总面积为2.85 km^2，纵坡比降为1:4.2，海拔在2600~3800 m范围内，年均降水量为433.6 mm，年均蒸发量为1081.7 mm，年平均相对湿度60%，年平均气温在-0.6~2.0 ℃之间，年均日照时数为1893 h，属于高寒半干旱山地森林草原气候[15-16]。实验区海拔2600~3300 m的阴坡和半阴坡建群种青海云杉呈斑块状或条状分布，灌木优势种为鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)等，草本植物主要为黑穗薹草(*Carex atrata*)、针茅(*Stipa capillata*)和珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等。

1.2 样地设置

2021年7月对海拔2700~3300 m内的祁连山排露沟流域中择优选取生长情况良好及基本未受到人为干扰的典型林分群落，根据立地条件和林分结构，建立了15个典型的青海云杉林固定样地(表1)并进行地形测定和更新苗调查，用全站仪将固定样地划分为20 m×20 m、20 m×36 m(因乔木林相对稀疏，故将该样地设置较大)。将20 m×20 m的样地分为16个5 m×5 m的小样方，20 m×36 m的样地划分

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of fixed plots

样地号	植被类型	优势树种	海拔/m	坡向	坡位	坡度/(°)
G1	藓类云杉林	青海云杉	2715	N	下	32
G2	藓类云杉林	青海云杉	2800	N	中	28
G3	藓类云杉林	青海云杉	2840	NE	中	16
G4	藓类云杉林	青海云杉	2952	N	中	33
G5	藓类云杉林	青海云杉	3015	N	中	22
G6	灌丛云杉林	青海云杉	3100	N	上	20
G7	灌丛云杉林	青海云杉	3300	NE	上	34
B1	藓类云杉林	青海云杉	2700	NE	下	35
B2	藓类云杉林	青海云杉	2860	N	中	30
B3	草类云杉林	青海云杉	2900	N	下	12
B4	藓类云杉林	青海云杉	3028	NW	下	25
B5	藓类云杉林	青海云杉	3097	N	下	23
B6	藓类云杉林	青海云杉	3195	NE	中	35
B7	藓类云杉林	青海云杉	2762	NE	中	30
B8	藓类云杉林	青海云杉	2730	N	下	25

为32个5 m×5 m的小样方，5 m×5 m的小样方总共有256个。

按倒“Z”字形顺序对样地内的青海云杉进行每木检尺，挂牌登记，测量相对坐标(x, y)及基径、株高、冠幅、枝下高等生长指标。参考拓锋等[17]对青海云杉林的径阶划分方法对样地中乔木基径小于1.0 cm的划分为幼苗，基径在1.0~5.0 cm范围内的划分成幼树。在每个更新苗样方中设置1 m×1 m小样格，对草本种类、数量、种均高度、种盖度和样方总盖度等进行调查。

1.3 空间分布格局

选择空间点格局分析方法中的单变量成对相关函数，对不同微地形生境中的更新苗进行空间分布格局分析。假设只有地形因子发挥作用，选择完全空间随机模型为零模型，利用蒙特卡罗模型进行验证不同微地形生境之间的更新苗分布格局是否具有关联性。从单变量的结果即可判断出，如果单变量成对相关函数数值分布在上下包迹线之内，即为随机分布；数值在上包迹线的上面，为聚集分布；数值在下包迹线的下面，则为均匀分布[17]。

1.4 数据处理

数据选择Microsoft Excel 2010软件进行整理和分析，微地形的数据在SPSS 26.0软件聚类分析划分不同的生境。选择青海云杉更新苗的4种更新特征(更新苗密度、平均冠幅、平均基径、平均株高)进行方差分析，然后采用相关性分析方法分析不同生境更新苗特征与地形因子的影响。数据制图使用Origin 2021软件完成，空间分布格局利用Programita Manual Enero 2014软件完成。

2 结果与分析

2.1 微地形生境划分

选择地形因子中的海拔、凹凸度和坡度将青海云杉林固定样地通过C-均值模糊聚类分析划分为4类不同生境(高海拔陡坡、高海拔斜坡、低海拔凸地和低海拔凹地)。从表2可以看出，高海拔斜坡样方数为84个，低海拔凹地样方数为76个，高海拔陡坡样方数为51个，低海拔凸地样方数为45个。在不同微地形因子中海拔和凹凸度之间具有显著差异性($P<0.05$)。海拔从高到低为：高海拔陡坡>高海拔斜坡>低海拔凸地>低海拔凹地；凹凸度由大到小为：低海拔凸地>高海拔陡坡>高海拔斜坡>低海拔凹地；高海拔陡坡、高海拔斜坡及低海拔凸地的凹凸度之间具有显著差异性($P<0.05$)，而高海拔斜坡与低海拔凹地之间不存在显著差异性($P>0.05$)。坡度由大到小为：高海拔陡坡>低海拔凹地>低海拔凸地>高海拔斜坡，低海拔凸地与低海拔凹地之间的坡度没有显著差异性($P>0.05$)，其余坡度存在显著差异性($P<0.05$)。

2.2 不同微地形青海云杉更新密度及分布特征

从表3中可以得到地形参数的样方数、幼苗、幼树数量以及更新密度。从海拔分析观察到，2718 m处幼苗和幼树更新密度最高，分别为626250株·hm^{-2}和243750株·hm^{-2}；2925 m海拔幼苗和幼树的数量最少，分别为0株和9株，更新密度比较小。同时幼苗、幼树更新密度在不同海拔存在显著性差异($P<0.05$)。从坡位分析显示，中坡位样方数最多，为128个，幼苗数量为238株，更新密度为761600株·hm^{-2}，更新能力较强。下坡位中的幼树数量最多，为137株，更新密度为164400株·hm^{-2}。数量最少的是上坡位幼苗和幼树，分别为91株和54株，其中更新密度分别为36400株·hm^{-2}、13200株·hm^{-2}。表明不同坡位之间的幼苗、幼树具有显著性差异，中坡位的幼苗和下坡位的幼树数量最多，更新能力相对而言较强。而数量和更新密度最少的分别是上坡位幼苗和幼树，说明其更新能力较差。在坡度范围内，

表2 青海云杉林固定样地4类地形生境特征

Tab. 2 Topographic habitat characteristics of four types of fixed sample land in *Picea crassifolia* forest

地形生境	高海拔陡坡	高海拔斜坡	低海拔凸地	低海拔凹地
样方数/个	51	84	45	76
面积/hm^2	0.13	0.21	0.11	0.19
海拔/m	3162.20±103.74a	3004.35±75.82b	2869.09±135.68c	2759.38±47.39d
凹凸度	0.01±1.29b	−0.43±0.78c	1.65±0.69a	−0.44±0.85c
坡度/(°)	33.41±3.66a	20.93±4.70c	30.67±4.99b	30.93±4.69b

注：海拔、坡度和凹凸度均值离差标准化后进行C-均值聚类，再还原为实际聚类中心值。同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表3 不同微地形条件下青海云杉更新密度及分布特征

Tab. 3 Regeneration density and distribution characteristics of *Picea crassifolia* under different microtopographic conditions

地形因子		样方数/个	占总样方比例/%	数量/株		更新密度/株·hm^{-2}	
				幼苗	幼树	幼苗	幼树
海拔/m	2684	16	6.25	2	20	800f	8000e
	2718	75	29.30	334	130	626250a	243750a
	2800	21	8.20	44	11	23100c	5775f
	2925	46	17.97	0	9	0	10350d
	3000	59	23.05	99	64	146025b	94400b
	3100	11	4.30	37	11	10175e	3025g
	3200	28	10.94	32	38	22400d	26600c
坡位	上坡位	32	12.50	91	54	36400c	13200c
	中坡位	128	50.00	238	92	761600a	294400a
	下坡位	96	37.50	219	137	262800b	164400b
坡度/(°)	6~15	16	6.25	0	0	0	0
	16~25	72	28.13	29	163	52031b	293400b
	26~35	128	50.00	55	259	175000a	828800a
	>36	40	15.63	27	126	26563c	126000c
坡向/(°)	北(337.5~22.5)	160	62.50	61	306	237656a	1193400a
	东北(22.5~67.5)	80	31.25	37	187	86289b	439450b
	西北(292.5~337.5)	16	6.25	13	55	10635c	45375c
凹凸度	<-2	10	3.90	14	5	1400c	500c
	-2~2	231	90.24	525	257	3228750a	1580550a
	>2	15	5.86	9	21	1800b	4200b

注：同一地形因子的更新密度中不同字母表示差异显著(P<0.05)。

26°~35°坡度样方数、幼苗和幼树数量及更新密度最多，分别为128个、55株和259株以及175000株·hm^{-2}、828800株·hm^{-2}。坡度在6°~15°处幼苗和幼树数量及更新密度最少。说明青海云杉幼苗和幼树在26°~35°坡度内生长最好，在6°~15°坡度中没有幼苗和幼树分布。

青海云杉林一般分布在阴坡和半阴坡，是喜阴树种。坡向中北方向样方数最多为160个，幼苗、幼树的数量分别为61株和306株，更新密度分别为237656株·hm^{-2}和1193400株·hm^{-2}。东北方向次之，西北方向最少。幼苗、幼树的数量和更新密度逐渐减少，更新能力由强变弱。若凹凸度>0，为凸面，表示该样方地势高于周围其他样方，反之为凹面。在-2~2的凹凸度中，样方数为231个，占样方总数的90.24%，幼苗和幼树的数量最多，分别为525株和257株，幼苗和幼树更新密度分别为3228750株·hm^{-2}和1580550株·hm^{-2}。在凹凸度>2的范围内，幼苗的数量和更新密度最少，而在凹凸度<-2的范围内数量和更新密度最少的为幼树。

2.3 不同微地形生境下的青海云杉更新苗特征

如图1所示，低海拔凹地更新苗密度显著高于其他3类微地形，更新能力较强，为387株·hm^{-2}；而高海拔斜坡和低海拔凸地次之，为138株·hm^{-2}；高海拔陡坡更新苗密度最低，为118株·hm^{-2}，更新能力最弱，其中低海拔凹地与高海拔陡坡、高海拔斜坡和低海拔凸地的更新苗密度有显著性差异(P<0.05)。在更新苗的平均冠幅中，低海拔凸地高于其他3类微地形，低海拔凹地高于高海拔斜坡，高海拔陡坡最低。高海拔陡坡与高海拔斜坡、低海拔凸地和低海拔凹地三者之间具有显著性差异(P<0.05)。在平均基径方面，不同生境按从大到小排列为低海拔凸地>高海拔斜坡>低海拔凹地>高海拔陡坡，高海拔陡坡显著低于其他3类微地形。在平均株高方面，高海拔陡坡显著低于其他3类微地形，高海拔陡坡与低海拔凸地及低海拔凹地之间具有显著性(P>0.05)，高海拔陡坡与高海拔斜坡之间无显著差异

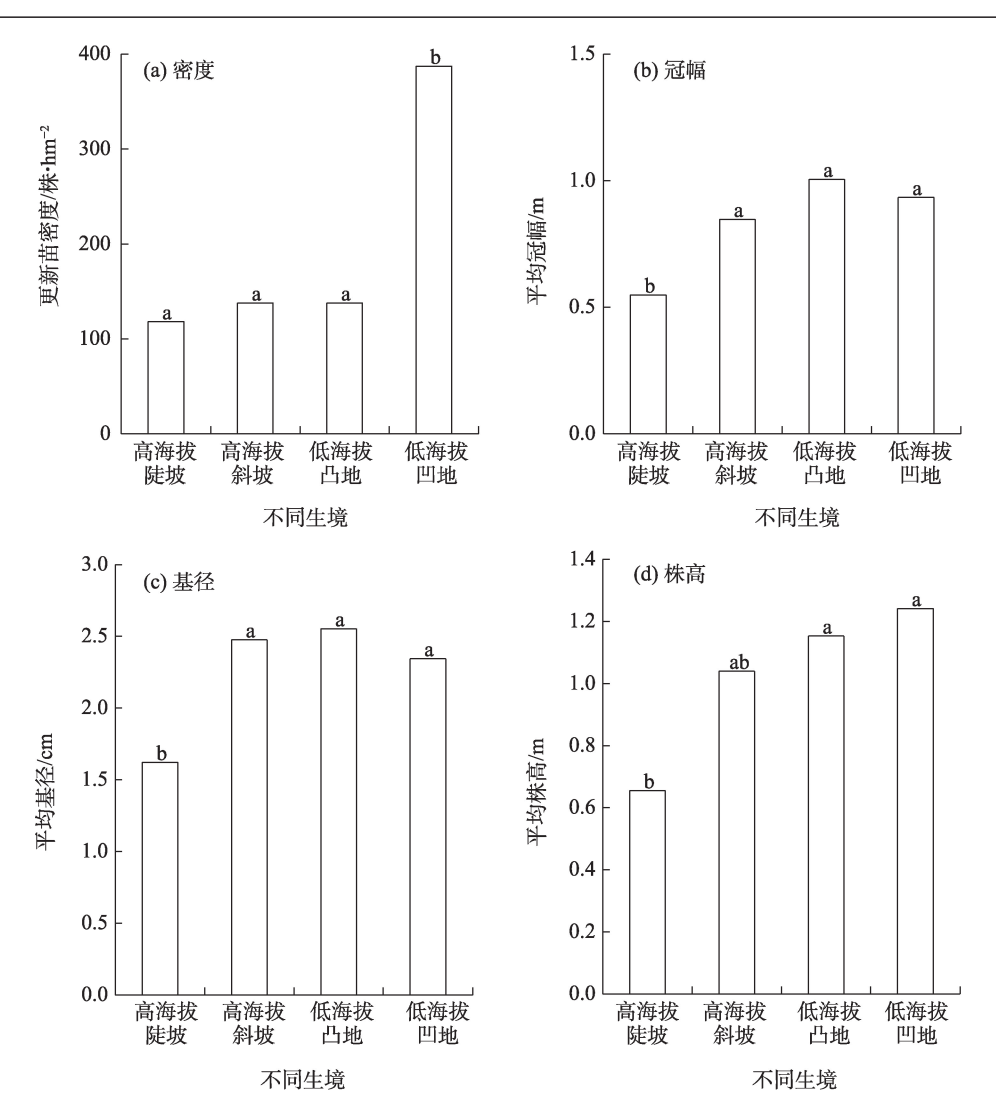


图1 不同微地形生境下的青海云杉更新苗密度及生长特征

Fig. 1 Density and growth characteristics of *Picea crassifolia* seedlings under different microtopographic habitats

($P>0.05$)。

2.4 不同微地形生境下青海云杉更新苗空间分布

从单变量成对相关函数分析结果(图2)可以看出低海拔凸地生境下更新苗在0~12.5 m范围内显示出聚集分布；12.5~13.5 m出现随机分布；14.5~15.5 m呈现均匀分布。高海拔陡坡中，更新苗呈现出聚集分布。在高海拔斜坡，更新苗0~6.5 m呈现出聚集分布；在7.5~15.5 m之间为均匀分布。低海拔凹地的更新苗在0~8.5 m范围内为聚集分布；9.5~10.5 m为随机分布；10.5~15.5 m又呈现聚集分布。

在高海拔陡坡和高海拔斜坡中更新苗出现随机分布(图3)；而低海拔凸地和低海拔凹地的更新苗出现聚集分布。

2.5 青海云杉更新特征与地形因子之间的相关性

不同微地形生境中，更新苗的特征与坡向之间无相关性($P>0.05$)，更新苗的部分更新特征与海拔、凹凸度、坡度和坡位之间存在相关性(表4)。在高海拔陡坡的微地形条件下，凹凸度与更新苗密度呈显著正相关($P<0.05$)；平均冠幅、平均基径、平均株高与海拔、坡度、坡向、坡位之间无显著相关性($P>0.05$)。

在高海拔斜坡生境中，平均株高与海拔存在显著负相关($P<0.05$)，其他更新特征与地形因子不具有显著相关性($P>0.05$)。在低海拔凸地条件下，平均基径和坡度之间具有显著相关性($P>0.05$)，更新苗密度、平均冠幅、平均株高与海拔、凹凸度、坡度、坡向、坡位之间无相关性($P>0.05$)。在低海拔凹地的生境条件下，平均基径与坡位存在显著相关性($P<0.05$)，而其他的更新特征与地形因子不存在显

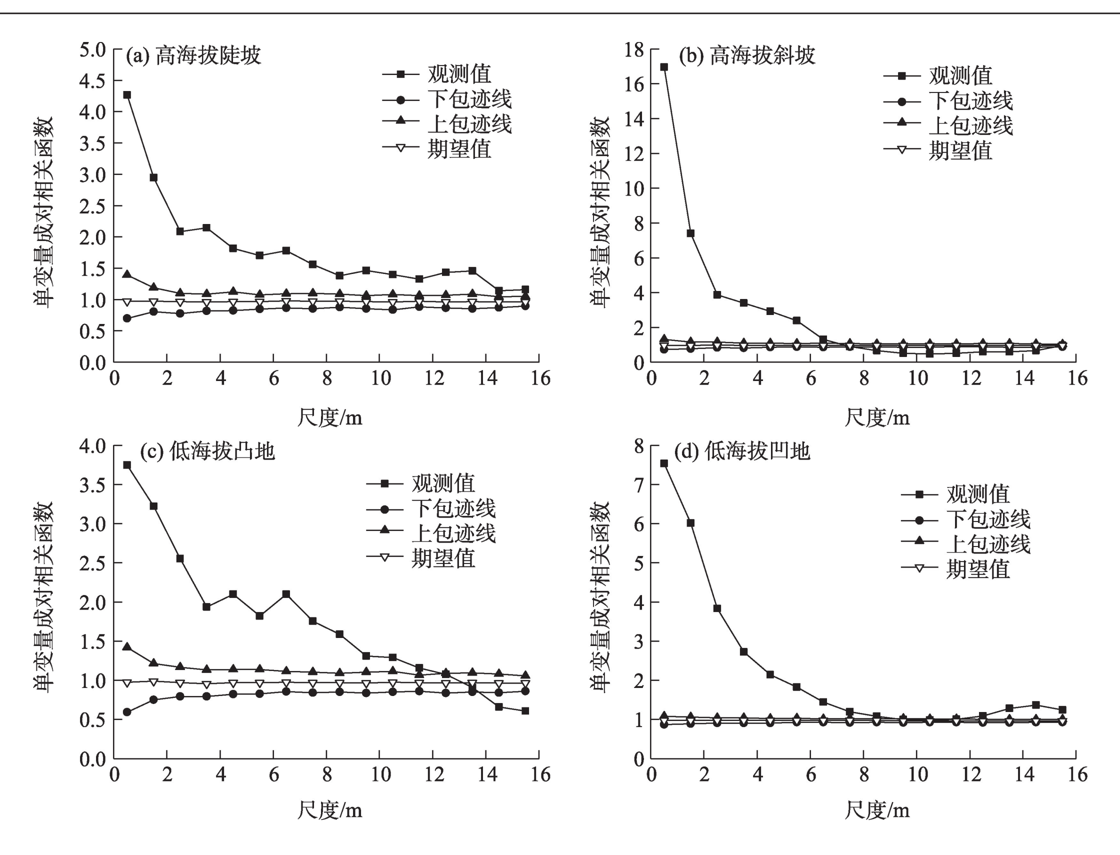


图2 不同微地形生境下青海云杉更新苗更新特征空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of regeneration characteristics of *Picea crassifolia* seedlings under different microtopographic habitats

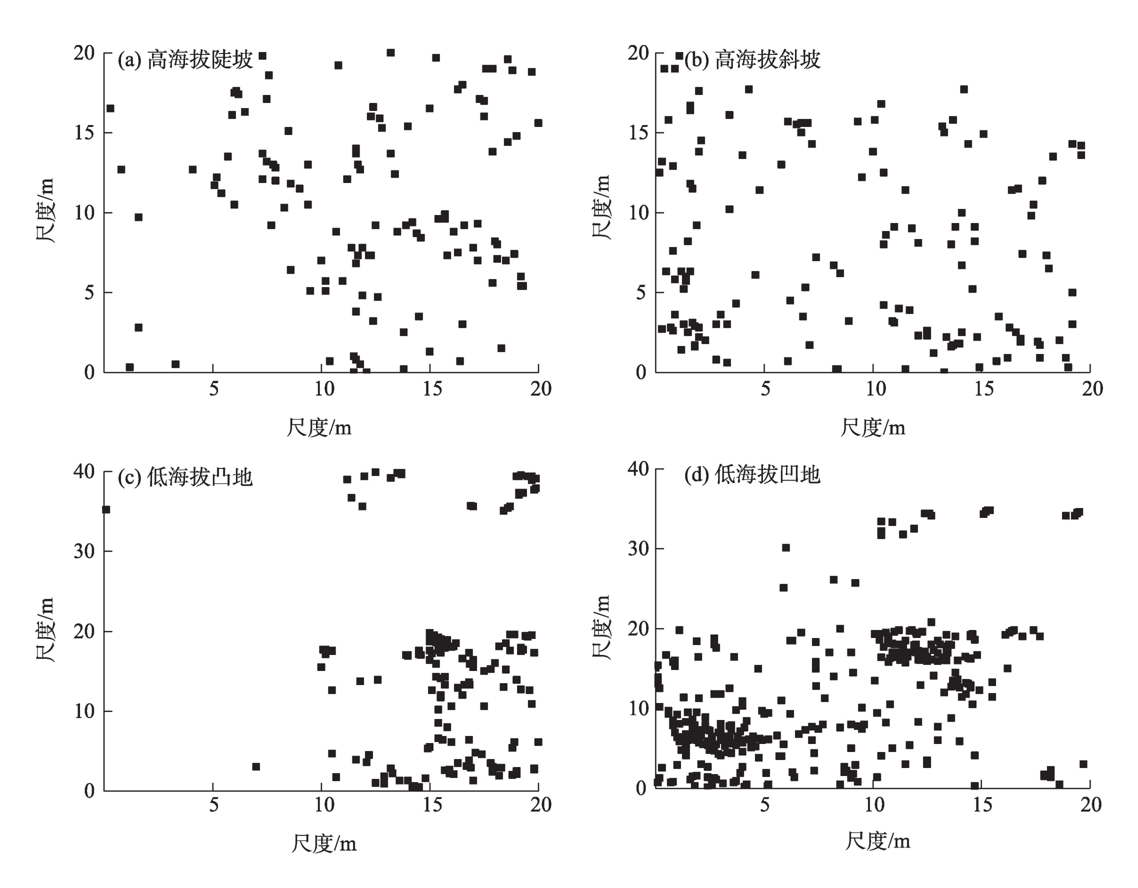


图3 不同微地形生境青海云杉更新苗更新特征空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of regenerations characteristics of *Picea crassifolia* seedlings under different microtopographic habitats

表4 不同微地形生境下更新苗更新特征与地形因子相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis between regeneration characteristics and terrain factors under different microtopographic habitats

地形生境	更新特征	海拔/m	凹凸度	坡度/(°)	坡向/(°)	坡位
高海拔陡坡	更新苗密度/株·hm^{-2}	−0.170	0.409*	−0.299	0.098	−0.047
	平均冠幅/m	0.142	0.184	0.265	0.131	−0.026
	平均基径/cm	0.235	0.230	0.347	0.076	−0.230
	平均株高/m	0.110	0.209	0.279	0.061	−0.103
高海拔斜坡	更新苗密度/株·hm^{-2}	0.155	0.113	0.091	0.276	0.058
	平均冠幅/m	−0.225	0.019	−0.201	0.139	0.078
	平均基径/cm	−0.206	−0.001	−0.264	0.025	−0.007
	平均株高/m	−0.362*	−0.019	−0.249	0.080	0.169
低海拔凸地	更新苗密度/株·hm^{-2}	−0.187	−0.043	0.065	0.067	0.071
	平均冠幅/m	−0.253	0.282	0.106	−0.237	0.189
	平均基径/cm	−0.029	0.223	0.318*	−0.260	0.138
	平均株高/m	0.032	0.219	0.277	−0.311	0.010
低海拔凹地	更新苗密度/株·hm^{-2}	−0.033	−0.171	0.090	−0.164	0.198
	平均冠幅/m	−0.027	0.187	0.111	−0.088	0.135
	平均基径/cm	−0.242	0.188	0.147	−0.259	0.303*
	平均株高/m	−0.076	0.048	0.126	0.220	0.212

注:*表示 $P<0.05$ 为显著性。

著相关性($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 不同微地形的青海云杉更新密度与分布特征

本研究发现海拔是影响青海云杉林天然更新的重要生态因子,更新苗密度随着海拔高度的升高而逐渐减少,与张凡兵等[18]的研究结果相一致。但2925 m的海拔梯度内更新苗的密度是最小的,根据实地调查所知这个海拔范围内的青海云杉林个体数量多,种内种间竞争激烈,更新苗所需的光照、水分等因素已被成年树占据,导致更新苗的生存空间受到挤压,使之减少。坡度较平缓,土壤水分容易储存,林分密度较高,郁闭度也较高,丁巧玲等[19]发现这些因素也限制了种子的萌发。林分密度随着坡度的增长而逐渐降低,为更新苗生长发育提供了生存空间,光照条件好、土壤透气性强,改善的微环境有利于幼苗抵御自然灾害[20]。北坡更新苗密度最高,东北坡次之,西北坡最低。在半阴坡,日照时间较短,青海云杉林地具有较厚的枯落物层和苔藓层,土壤水分储备充足,有利于更新苗生长;而阳坡、半阳坡的日照时间较长、辐射较强、水分易蒸发、导致土壤含水率较低,不利于更新苗的生长及发育。

3.2 不同微地形生境更新特征分析

不同微地形生境青海云杉更新特征差异分析发现,低海拔凹地更新苗密度显著高于其他3类微地形,低海拔凹地更新苗密度较大,说明幼苗数量多,对种内种间激烈竞争所造成的青海云杉种群个体缺失的数量进行补充,使种群保持稳定状态,并且呈现出增长趋势[21]。但地势低洼,水分充足,溪流容易对沟谷地带冲刷,导致土壤层流失,抑制植株生长[22]。从4类不同生境显示出,高海拔陡坡的更新苗密度、平均冠幅、平均基径、平均株高比其他生境更新特征低,较低的郁闭度容易形成林隙,林隙具有充足的光照和生长空间能满足更新苗的需求[23]。但高海拔陡坡坡度较大,水土易流失,不利于生长发育。因此,为保持种群数量稳定,种群结构不被破坏,要加强对幼苗幼树及其生存环境等的人工保护监测和改善。

3.3 更新苗更新特征与微地形生境的空间分布格局及相关性

一般而言,在小范围内种群的分布模式受到种群生态学变化特征的制约(如青海云杉的种子扩散限制、幼苗补充的过程以及种群的种内种间竞争

等）;在大范围内,自然环境异质性（如光照、水分、温度、土壤等条件）的制约对种群空间分布格局产生了显著性影响[24]。植株生长或分布的格局变化往往又与一些生物或非生物之间存在联系,3种空间分布模式分别为:聚集分布、均匀分布和随机分布[25]。本研究中,种子距离母株的位置越远,种子的数量越少,新出现的个体种群以聚集的状态分布,青海云杉更新苗数量随着尺度的增大而减少。更新苗在一个较小的尺度范围内最先形成聚集分布,然后又逐渐过渡到较大尺度范围内随机分布。聚集分布对于各种群个体的生长有利,可以抵御各种外部恶劣条件,从而提高种群个体的成活率[17]。

青海云杉是耐阴树种,一般分布在阴坡和半阴坡,土壤水分容易留存,水分供应对植物生长发育有重要的作用,但在相似的微环境中,青海云杉林在不同生长阶段对环境变化的反映情况也不相同。高海拔斜坡的海拔与更新特征之间具有相关性,说明随着海拔高度的逐渐上升,水热条件便逐渐开始成为植株生长及发育过程的限制性因子,更新苗的个体数量逐渐减少,与黄甫昭等[26]和把黎等[27]的研究结果一致。低海拔凸地的坡度与更新特征具有相关性,随坡度的增加,青海云杉成年树的生长由于地形以及环境因子受到限制,林窗较多,植株生存空间增大,有利于植株生长。高海拔陡坡的更新苗密度与凹凸度存在正相关,凹地整体呈现出凹形,土壤温度相对较低,种子有利于储存,但种子需要达到一定的温度条件才可以萌发。因此,凹地更新苗密度比其他微地形略小。土壤水分条件满足更新苗生长的情况下,光照条件、生存空间成为青海云杉天然更新的限制条件[28]。

4 结 论

微地形通过对光照、水分和土壤养分等的二次分配影响更新苗的分布和生长,本文将排露沟流域的青海云杉林固定样地划分为了4个不同的微地形生境,研究了不同微地形影响下青海云杉林更新苗的更新特征,得出以下主要结论:

（1）青海云杉林的幼苗个体数量随着海拔的升高而呈现为先增加后减少的趋势,且地形因子中的凹凸度、坡度、坡向及坡位不同程度影响着青海云杉林的天然更新,表明低海拔凸地和低海拔凹地中更新苗适宜定居和生长。

（2）青海云杉林更新苗的径级结构呈现近似倒“J”型,分布状态为增长型,表明青海云杉林更新苗生长状况良好。对祁连山森林涵养水源及生物多样性保护和维持的研究起着非常重要的作用。今后要加强对更新苗的保护,使其形成健康的森林生态系统,对生态环境的协调发展起到科学的决策支撑。

参考文献（References）

[1] Moktan M R, Gratzer G, Richards W H, et al. Regeneration of mixed conifer forests under group tree selection harvest management in western Bhutan Himalayas[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(10): 2121–2132.

[2] Wright S J, Muller-Landau H C, Calderón O, et al. Annual and spatial variation in seed fall and seedling recruitment in a neotropical forest[J]. Ecology, 2005, 86(4): 848–860.

[3] 陈圣宾, 宋爱琴, 李振基. 森林幼苗更新对光环境异质性的响应研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 365–370. [Chen Shengbin, Song Aiqin, Li Zhenji. Research advance in response of forest seedling regeneration to light environmental heterogeneity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 365–370.]

[4] Muscolo A, Sidari M, Mercurio R. Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine (*Pinus laricio*, Poiret) stands[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 242(2–3): 412–418.

[5] 陈永富. 森林天然更新障碍机制研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(2): 41–45. [Chen Yongfu. Research progress on the mechanism of natural regeneration barriers in forests[J]. World Forestry Research, 2012, 25(2): 41–45.]

[6] Collins R J, Carson W P. The effects of environment and life stage on *Quercus* abundance in the eastern deciduous forest, USA: Are sapling densities most responsive to environmental gradients[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 201(2–3): 241–258.

[7] Scherrer D, Körner C. Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming[J]. Journal of Biogeography, 2011, 38(2): 406–416.

[8] 刘海丰, 桑卫国, 薛达元. 暖温带森林优势种群的地形生境变异性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 795–801. [Liu Haifeng, Sang Weiguo, Xue Dayuan. Topographical habitat variability of dominant species populations in a warm temperate forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(4): 795–801.]

[9] Daws M I, Pearson T R H, Burslem D F R P, et al. Effects of topographic position, leaf litter and seed size on seedling demography in a semi-deciduous tropical forest in Panamá[J]. Plant Ecology, 2005, 179(1): 93–105.

[10] Lu J, Johnson D J, Qiao X, et al. Density dependence and habitat

preference shape seedling survival in a subtropical forest in central China[J]. Journal of Plant Ecology, 2015, 8(6): 568-577.

[11] 赵家豪, 孙晓丹, 叶钰倩, 等. 微地形对江西武夷山南方铁杉针阔混交林幼树更新的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2357-2367. [Zhao Jiahao, Sun Xiaodan, Ye Yuqian, et al. Effect of micro-topography on the saplings regeneration in the coniferous (*Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis*) and broadleaf mixed forest in the Wuyishan, Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2357-2367.]

[12] 赵雪, 刘妍妍, 金光泽. 地形对阔叶红松林幼苗更新的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3035-3042. [Zhao Xue, Liu Yanyan, Jin Guangze. Effects of topography on seedling regeneration in a mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3035-3042.]

[13] 郭小芹, 李光明, 孙占峰, 等. 祁连山及周边降水分布聚类检验和典型流域增雨效果评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 706-714. [Guo Xiaoqin, Li Guangming, Sun Zhanfeng, et al. Cluster analysis with statistical test of precipitation distribution in Qilian Mountains and its surrounding area and evaluation of artificial precipitation enhancement in typical watershed[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 706-714.]

[14] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 113-121. [Zhao Chuanyan, Bie Qiang, Peng Huanhua. Analysis of the niche space of *Picea crassifolia* on the northern slope of Qilian Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 113-121.]

[15] 杨晓霞, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 197-207. [Yang Xiaoxia, Zhao Jinmei, Zhang Xue, et al. Litter and soil water conservation function of typical shrubs in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 197-207.]

[16] 刘鹄, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2390-2391. [Liu Hu, Zhao Wenzhi, He Zhibin, et al. Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2390-2391.]

[17] 拓锋, 刘贤德, 刘润红, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群空间格局及其关联性[J]. 植物生态学报, 2020, 44(11): 1172-1183. [Tuo Feng, Liu Xiande, Liu Runhong, et al. Spatial distribution patterns and association of *Picea crassifolia* population in Dayekou Basin of Qilian Mountains northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(11): 1172-1183.]

[18] 张凡兵, 龙婷, 金文斌, 等. 红松林天然更新对连续小梯度海拔变化的响应[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(5): 1-10. [Zhang Fanbing, Long Ting, Jin Wenbin, et al. Natural regeneration of primitive Korean pine forests in response to the variation in continuous small elevation gradient[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(5): 1-10.]

[19] 丁巧玲, 刘忠成, 王蕾, 等. 湖南桃源洞国家级自然保护区南方铁杉种群结构与生存分析[J]. 西北植物学报, 2016, 36(6): 1233-1244. [Ding Qiaoling, Liu Zhongcheng, Wang Lei, et al. Structure and survival analysis of *Tsuga chinensis* populations in Taoyuandong National Nature Reserve, Hunan Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(6): 1233-1244.]

[20] 曾德慧, 尤文忠, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林天然更新障碍因子分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 257-261. [Zeng Dehui, You Wenzhong, Fan Zhiping, et al. Analysis of natural regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 257-261.]

[21] 拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6871-6882. [Tuo feng, Liu Xiande, Huang Dongliu, et al. Quantitative dynamics of *Picea crassifolia* population in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6871-6882.]

[22] 郭屹立, 王斌, 向悟生, 等. 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面积分布格局及其对地形因子的响应[J]. 生物多样性, 2016, 24(1): 30-39. [Guo Yili, Wang Bin, Xiang Wusheng, et al. Responses of spatial pattern of woody plants' basal area to topographic factors in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(1): 30-39.]

[23] 刘何铭, 杨庆松, 方晓峰, 等. 亚热带常绿阔叶林林窗物种丰富度的影响因素[J]. 生物多样性, 2015, 23(2): 149-156. [Liu Heming, Yang Qingsong, Fang Xiaofeng, et al. Influences on gap species richness in a subtropical evergreen broadleaved forest[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(2): 149-156.]

[24] Shen G, He F, Waagepetersen R, et al. Quantifying effects of habitat heterogeneity and other clustering processes on spatial distributions of tree species[J]. Ecology, 2013, 94(11): 2436-2443.

[25] 李艳丽, 杨华, 亢新刚, 等. 长白山云冷杉针阔混交林天然更新空间分布格局及其异质性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 311-317. [Li Yanli, Yang Hua, Kang Xingang, et al. Spatial heterogeneity of natural regeneration in a spruce-fir mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 311-317.]

[26] 黄甫昭, 王斌, 丁涛, 等. 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系[J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 157-166. [Huang Fuzhao, Wang Bin, Ding Tao, et al. Numerical classification of associations in a northern tropical karst seasonal rain forest and the relationships of these associations with environmental factor[J]. Biodiversity Science, 2014, 22(2): 157-166.]

[27] 把黎, 尹宪志, 庞朝云, 等. 祁连山地区夏季南坡与北坡空中云水资源差异性分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1345-1359. [Ba Li, Yin Xianzhi, Pang Chaoyun, et al. Characteristics of the difference in air water resources between the north and south slopes of the Qilian Mountains in the summer[J]. Arid Zone Re-

search, 2022, 39(5): 1345−1359.]

[28] 童翠芸, 王占林, 张得芳, 等. 土壤水分含量和光照强度对青海云杉光合特性的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 22−26. [Tong Cuiyun, Wang Zhanlin, Zhang Defang, et al. Effects of soil moisture content and light intensity on the photosynthetic characteristics of *Picea crassifolia*[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 22−26.]

Response of *Picea crassifolia* forest regeneration characteristics to topographic factors in Pailugou watershed of Qilian Mountains

LU Xiongying[1], LIU Xiande[1,2], MA Rui[1], ZHAO Weijun[2], JING Wenmao[2], HE Xiaoling[3], ZHAO Changxing[4]

(1. Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Qilian Mountain Water Conservation Forest Research Institute of Gansu Province (Gansu Qilian Mountain Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station), Zhangye 734000, Gansu, China; 3. School of Resources and Environment, Northwest A & F University, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 4. College of Grassland Agricultural Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In order to explore the influence of microtopography on the natural regeneration of *Picea crassifolia* seedlings in Qilian Mountains, *Picea crassifolia* forest was selected as the research object, and the topographic parameters (altitude, convexity and slope) of 15 fixed plots in the watershed were divided into four different microtopographic habitats by C-mean fuzzy clustering, and the effects of microtopographic habitats on the renewal characteristics (renewal seedling density, average crown width, mean base diameter and average plant height) of the regeneration seedlings were studied. The results show that: (1) The average crown width and mean base diameter of regenerated seedlings were in the order of low-altitude convex land>high-altitude slope>low-altitude concave land>high-altitude steep slope. The average plant height on high-altitude steep slopes was considerably lower than that in the other three microtopographies. Thus, different altitudes, slopes, aspects, and slope positions considerably affected the survival rate and growth process of regeneration seedlings. (2) The renewal seedling density and average plant height under different microtopographic conditions were as follows: low-altitude concave land, low-altitude convex land, high-altitude slope, and high-altitude steep slope. (3) Most of the regenerated seedlings showed an aggregated distribution under different microtopography in the order of high-altitude steep slope>low-altitude concave>low-altitude convex>high-altitude slope. (4) The results of the correlation analysis showed that there was a significant correlation between altitude, slope, slope position, and regenerated seedlings (P<0.05). In summary, the natural regeneration of *Picea crassifolia* forest was significantly affected by microtopographic habitat (P<0.05), and seedlings were more suitable for settlement and growth in low-altitude convex land and low-altitude concave land.

Key words: *Picea crassifolia* forest regeneration seedlings; microtopography; spatial distribution pattern; elevation; Qilian Mountains